



TITLE:

熱伝導下でのイジングモデルにおける界面運動(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

増本, 雄亮

CITATION:

増本, 雄亮. 熱伝導下でのイジングモデルにおける界面運動. 京都大学, 2019, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21553>

RIGHT:

許諾条件により本文は2019-05-21に公開

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	増本 雄亮
論文題目	熱伝導下でのイジングモデルにおける界面運動		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>物質中を高温から低温へと熱が流れる熱伝導現象は日常的普遍的に見られ、統計力学の分野でも活発に研究されてきた。1990年代までは熱流が温度勾配に比例するフーリエ則の成立自体が問題とされ、格子力学系について互いに矛盾するようなさまざまな数値計算の結果があったが、現在では低次元系で熱伝導率が系の大きさとともにべき的に増大し、熱力学極限で発散する異常熱伝導が起こることが確立し、カーボンナノチューブを用いた実験でも検証されている。また、熱のキャリアは通常格子振動や電子であるが、スピン励起も熱を伝えることがあり、近年その性質が活発に研究されている。そうした中で、界面の運動と熱伝導の関わりについてはあまり研究が進んでいない。ようやく近年、スピントロニクスの進展に伴い、磁壁を熱流で制御しようとする試みが行われ、イットリウム鉄ガーネットを用いた実験で、磁壁が高温側で動くことが確認された。また、理論的な解析としては、確率的ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を用いた数値計算があり、やはり磁壁が高温側へ動くという結果が得られている。しかし、この数値計算では温度勾配をあらかじめ与え、それに対応するノイズを使用しているが、局所的な温度は熱伝導の結果として決まるべきものであり、熱伝導と界面の運動を同時に扱ったものとはいえない。また、比較的短時間の計算で磁壁が一方向へ動くことを示しているにとどまり、長時間での界面の運動や分布がどのようになるかといった問題は扱われていない。そこで増本氏は、界面の運動と熱伝導を同時に扱うことのできる最も簡単なモデルであるイジングモデルを用いた研究を行った。第1章ではこのような研究の背景と問題意識が述べられている。</p> <p>第2章ではシミュレーションに用いた時間発展則が説明される。イジングモデルはダイナミクスを持たないので、時間発展則はエネルギーとは別に与える必要がある。平衡系の場合は、与えられた温度の平衡分布に収束するような確率的時間発展則が用いられることが多いが、上述の理由によりこれは熱浴に接しているスピンに対してのみしか使用できない。そこで、通常のスピン自由度の他に運動エネルギー項を付け加え、バルクの時間発展は局所的エネルギー保存則を満たすように行うという手法が開発されている。最も有名なのはクロイツによるものであるが、低温で時間発展が極端に遅くなり、界面が動かなくなる、系が平衡に達しないなどの不具合がある。そのため増本はクロイツルールに次近接スピンの交換もエネルギー保存が満たされれば可能とするダイナミクスを取り入れたり、サイトではなくボンドに運動エネルギーを割り当てるルールを採用することで、この問題を解決した。</p> <p>第3章では2次元系の結果が紹介される。界面の運動は局所物理量の時系列のパワースペクトルに指数$-1/2$のべき則を生じるという1次元系で知られた結果を拡張し、界面の幅の情報を取り込むことに成功した。さらに、非平衡条件下での界面の確率分布、パワースペクトル等の情報から、界面の運動は高温側へ向かうドリフト力を伴う拡散過程であることを見出した。</p> <p>第4章は3次元系の結果である。3次元イジングモデルでは界面の粗さが変化するラフニング転移という現象が起こる。界面の拡散係数の温度依存性の変化と界面の幅の同様の变化から、非平衡条件下でラフニング温度が変化すると解釈できる数値計算の結果が紹介される。</p> <p>第5章はまとめと今後の展望が述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

界面という特徴的な構造に着目して物理現象を考察する研究は古くから行われている。太田による相分離に伴う秩序形成ダイナミクスなど成功例も多い。また、K P Z 方程式のように、界面の運動を記述する方程式が広い普遍性を持ち、界面を超えて格子熱伝導の伝搬モードとしても現れるという例も知られている。しかしながら、界面があることで熱伝導が促進されるのか抑制されるのか、あるいはその逆に熱伝導は界面の運動にどのような影響を及ぼすのかといった問題はあまり研究されてこなかった。論文内容に記した熱輸送による界面の制御が試みられたのも2013年のことであり、それ以降もいくつかの進展が見られるのみである。本学位論文は、そのような研究に対して先鞭をつけるものと言えるだろう。

このようなテーマに対して、イジングモデルを用いて研究を行うというのは非常に野心的な試みである。実験と直接対比できる模型ではなく、簡単な構造のイジングモデルを用いることで、長時間のシミュレーションが可能になった。クロイツルールのようなセルオートマトン型の時間発展則は、提案はされていたものの、低温での困難などのため、広く応用されてはこなかった。本研究では、さらに改良を加えることで、十分低温で熱伝導と界面の運動を同時に扱うことができるダイナミクスを実現している。このような時間発展は人工的ではあるものの、局所的エネルギー保存則を満たすミクロカノニカル型の時間発展として、現実の系の性質を反映するものになっていると期待される。

本学位論文の成果は、一つは界面の運動が高温側へのドリフト力を伴う拡散運動であることを明らかにした点であり、もう一つは3次元系でラフニング転移温度が熱流のある系では平衡系の転移温度からずれる可能性があることを数値的に示したことである。前者を示すためには、界面の運動の特徴を捉える道具として、局所的な物理量の時系列のパワースペクトルが用いられた。1次元系の界面の拡散に関して、そのようなパワースペクトルにベキ則が現れることが知られており、単純排他過程と呼ばれる系に応用されていたが、これを2次元に拡張し、界面の幅やドリフト力の情報まで引き出すことに成功した。これは本論文の極めて独創的な点である。また、後者のラフニング転移点のずれは、界面の拡散係数の温度依存性のクロスオーバーと界面の幅の温度依存性から一致する結果が得られたものであり、誤差が大きいものの理論に対して非常に示唆的な結果となっている。このような非平衡環境下でのラフニング転移点のずれに関しては、理論的な研究はなく、非平衡統計力学の研究者に対して刺激を与える結果である。

主論文は61ページにわたって詳細に書かれており、問題意識から結果の意味するところまで、明快に表現されている。上に述べたように、本学位論文は界面の運動、熱伝導、ラフニング転移という異なる現象の間の関係について、独創的な方法で解明を試みたものであり、非平衡統計力学の進展に対して貢献を与えるものであると評価できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降